

航空機衝突防止装置の受信信号で観測された誤応答 False Replies Detected by Airborne Collision Avoidance System

小瀬木 滋* 福田 豊* 白川 昌之*

Shigeru OZEKI, Yutaka FUKUDA, Masayuki SHIRAKAWA

Abstract

Airborne Collision Avoidance System (ACAS) is a similar type of secondary radar to survey and detect the threat aircraft. The ACAS is compatible with the ground Secondary Surveillance Radar (SSR) and measures the positions of those aircraft equipped with ATC transponder.

It has been well known that the surveillance performance of SSR is being degraded due to various causes such as garbling in a dense airspace or multipath effects etc. These types of degradations will arise depending on the specific airspace in which ACAS is operating.

A study was conducted to determine the degradation effect on ACAS performance based on the flight experiment data obtained in the actual airspace environment in Japan.

One of the degradations experienced was the one related to the range data on which the abnormal slant range errors of about 1 nautical mile were observed. It was found that the 1 nautical mile short range error had occurred only for the aircraft located in a relative positions which the multipath pulses were supposed to have been received with the delay time of 7 to 9 microsecond. It is analyzed that the cause of jump range error will be the false selection of the reply mode (i.e. mode A) at the transponder which is considered to have been triggered by the strong multipath echo reflected from the surface of the sea although the interrogation was made on mode C.

This paper shows the result of the analysis of this interesting phenomena and the calculation of the degradation effect with some assumptions.

* 電子航法開発部

1 まえがき

航空機衝突防止装置 (Airborne Collision Avoidance System : ACAS) は、周辺の航空機を監視し必要に応じて適切な回避行動をパイロットに助言するシステムである。ACAS は小型の二次レーダと電子計算機を組み合わせたシステムであり、航空機に搭載して使用される。ACAS のインタロゲータは相手機の ATC トランスポンダから高度等のデータを含む応答信号を取得し、相手機との位置関係を測定する。このとき用いられる信号は SSR モード S および現用の SSR と共用性がある⁽¹⁾⁽²⁾。このようにして得られた位置関係のデータをもとにして、ACAS は衝突の危険性がある航空機を検出し上下方向の回避行動をパイロットに助言する。現在 ACAS の国際標準を制定する作業が ICAO で行われており、実用化および改良のための研究が各国で進められている。

周辺の航空機的位置を測定する ACAS の監視能力を低下させる主な原因は、その送受信信号に発生する混信妨害である。ACAS は、その空中線ビーム幅が SSR 地上局のものより広いため、混信妨害の影響を受け易い。混信妨害の発生状況は ACAS が使用される空域によって大きく異なるが、日本国内での測定結果はまだ少ない⁽³⁾⁽⁴⁾。そこで当研究所では、試作した ACAS 実験装置を用いて ACAS が置かれる電波環境・交通環境およびこれら実環境での ACAS の動作状態等を調査中であり、現在も実験データの収集・解析中である⁽⁵⁾。これまでに収集したデータを分析した

結果、その一部にはこれまでの ACAS の実験結果に報告例が見あたらない種類の監視能力の低下が記録されていた。これは相手機的位置データが消失するとともに実際の位置よりも近いところに誤ターゲットが発生する現象である。この場合、ACAS は相手機を正しくトラッキングできなくなることがあると考えられる。本文では、この現象の測定結果とその原因を推定した過程、ACAS の性能への影響を予測した結果などについて報告する。

2 飛行実験および観測された現象

この章では、最初に飛行実験の方法について説明する。次に、実験で観測された前述の現象についてまとめる。

2.1 実験方法

実験では ACAS 実験装置を航空機に搭載し、週辺を飛行する航空機の ATC トランスポンダとの間で信号の送受信を行った。これまでに周辺の航空機的位置 (トラフィックデータ) 及び受信信号波形の 2 項目について測定を行った。

飛行実験に用いた ACAS 実験装置の概要を図 1 に示す。この装置は、簡易な ACAS インタロゲータ、制御用電子計算機、波形測定用のデジタイザ、及び、磁気テープ記録装置から構成されている。機材の主な仕様を表 1 に示す。以下、各機材の概要をまとめる。

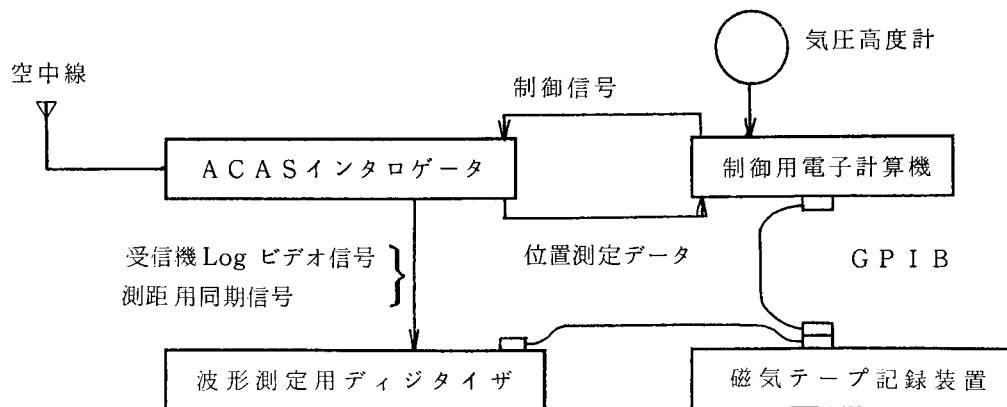


図1 実験装置の概要

2.1.1 実験用ACASインタロゲータ

実験に使用したACASインタロゲータは実用型の機材と比較して機能が一部省略されており、混信妨害対策では Whisper/Shout, 指向性質問, 空中線切り替え等の機能を持たない⁽²⁾。

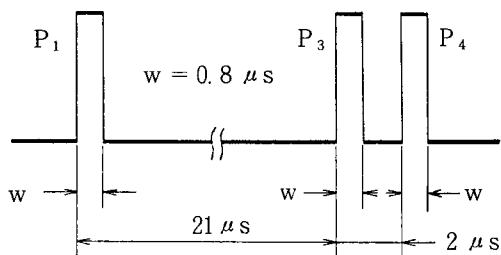
実験装置が送受信する基本的な信号形式は実用型ACASと同じである。今回の実験に使用した質問信号形式を図2(a)に、比較のための現用SSRの質問信号形式を図2(b)に各々示す。これらのインタロゲータは質問信号の P_1 および P_3 パルスの間隔(質問モード)を適切に設定することによって, ATCTランスポンダの応答符号を選択できる。現用SSRでは, モードAおよびCの2種類が民間航空用に使用されている。質問信号のパルス間隔は, モードAが $8\mu\text{s}$, モードCが $21\mu\text{s}$ である。応答符号の意味はモード毎に決められており, モードAは管制補助の目的で各航空機に割り当てられる識別符号, モードCはその航空機の気圧高度を表す符号である。

今回の実験に用いた質問信号形式はモードC一括質問信号(Mode-C only all call)と呼ばれ, モードSトランスポンダの応答を抑圧すると同時に現用のATCTランスポンダから気圧高度情報を含む応答信号(モードC応答信号)を引き出すために使用される。現用のATCTランスポンダは P_4 パルスを見捨てるため, 現用SSRのモードC質問信号に対するものと同じ応答信号を送信する。

図2(b)の P_2 パルスは, SSR空中線のサイド

ローブから放射される質問信号がATCTランスポンダをトリガしないようにするための抑圧信号である。 P_2 パルスの送信電力は, メインローブ内の P_1 および P_3 パルスの電力より小さくかつサイドローブ内よりは大きくなるように設定される。この P_2 パルスが P_1 パルス以上の電力で受信された場合, ATCTランスポンダは応答信号を送信しない。今回の実験用ACASインタロゲータは, SSRとは異なり P_2 パルスを送信しない。

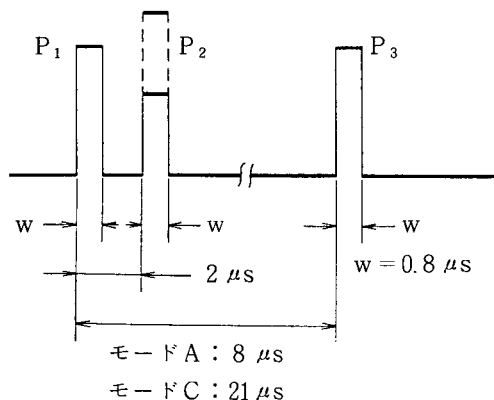
実験装置が受信する信号は現用のATCTランスポンダの応答信号である。現用のATCTランスポンダの応答信号の形式を図3に示す。 F_1 および F_2 はフレーミングパルスと呼ばれ, インタロゲータのデコーダはこれらと同じ間隔を持つパルス対を検出すると応答信号の解読処理を開始する。これらのパルスには含まれた部分に, A_1 から D_4 までの12ビットの符号パルスおよびXビットの位置が定められている。定められた位置にパルスがあるとそのビットの値が1であり, ない場



(a) 実験に用いたモードC一括質問信号

表1 ACAS実験装置の主な仕様

送信周波数	1030 MHz
送信電力	56 dBm
送信信号	モードC一括質問信号 モードS質問信号
受信周波数	1090 MHz
受信周波数帯域幅	$\pm 6.5\text{ MHz}$
受信機MTL	-74 dBm
受信信号	ATCRBS応答信号 モードS応答信号
空中線	ブレード空中線(機体上部/下部) 水平面内無指向性
電子計算機	NEC社 FC9801X PC9801 VX相当(工業用)
磁気テープ記録装置	アンリツ社 DMT750 最大記録容量 約39MB
波形測定装置	ソニー・テクトロニクス社 R390AD 最大サンプルレート60 MHz 精度 10 bit 記録容量 4kワード



(b) 現用SSRの質問信号

図2 質問信号の比較

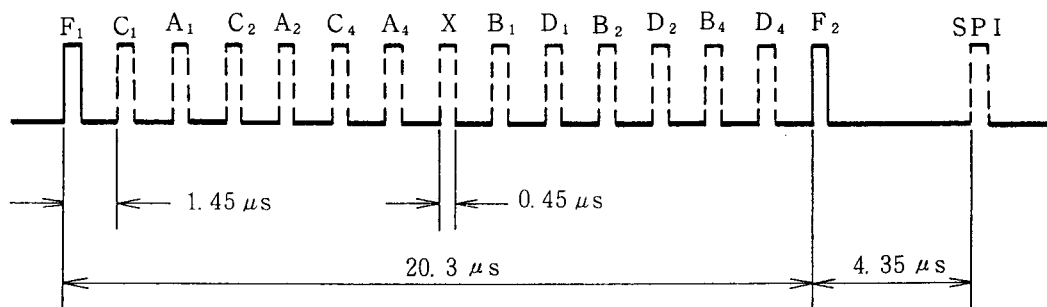


図3 ATCトランスポンダの応答信号

合には0であることを示す。現在Xビットは使用されていない。モードAおよびCの応答信号は、符号の意味が異なるのみで形式は同じである。気圧高度計が接続されていないATCトランスポンダも存在するが、これらはモードC質問信号に対してフレーミングパルスのみを応答する。ACASインタロゲータのデコーダは受信した応答信号を処理して、距離測定値、解読した応答符号および各符号ビットの信頼性を表すコンフィデンスフラグを出力する。

ACASインタロゲータはこの他にもモードS信号を送受信できるが、実験用モードSトランスポンダがまだ運用されていないため、今回の実験では使用していない。

ACASインタロゲータの動作は、後述の電子計算機で制御されている。

2.1.2 デジタイザ

受信信号波形の測定にはデジタイザを用いた。ACASインタロゲータの受信機Logビデオ信号をデジタイザに入力し、サンプリングしてその振幅をデジタルデータに変換した。デジタイザの分

解能は10ビットである。サンプリング周波数は20 MHz とし、記録長は1回あたり4,096サンプルとした。ACASインタロゲータは質問信号を送信するときに測距用の同期信号を出力するため、これをサンプリング開始のトリガ信号とした。これによって、約14.9 NMの距離までの応答信号波形を記録することができる。

このデジタイザは、GPIBを通して後述の電子計算機によって制御されている。

2.1.3 電子計算機

電子計算機は、実験項目に応じて実験機器の制御を行う。特に、航空機位置の測定実験では、測定した位置データを用いて、ACASと同様な衝突回避の判断処理も実行する。その概要は、後で本文の4.1以降および図14に示す。また、電子計算機は、データを編集して磁気テープに転送する。各実験において記録されるデータを表2に示す。

トラフィックデータ取得のための位置測定は毎秒1回行うが、この測定間隔は実用型のACASと同じである。一方、受信波形の測定は、データ

表2 記録される実験データ

実験項目	記録されるデータ
トラフィック測定	測定開始時：測定開始時刻
	位置測定毎：測定開始後経過時間、回避指示自機気圧高度、検出航空機数、トラッキング中の航空機数、検出した各航空機の距離測定値と応答符号解読値および各ビットの信頼性フラグ
波形測定	測定開始時：測定開始時刻
	サンプル周波数等測定パラメータ 波形測定毎：測定開始後経過時間、離散化及び量子化された波形データ



図4 空中線取り付け位置

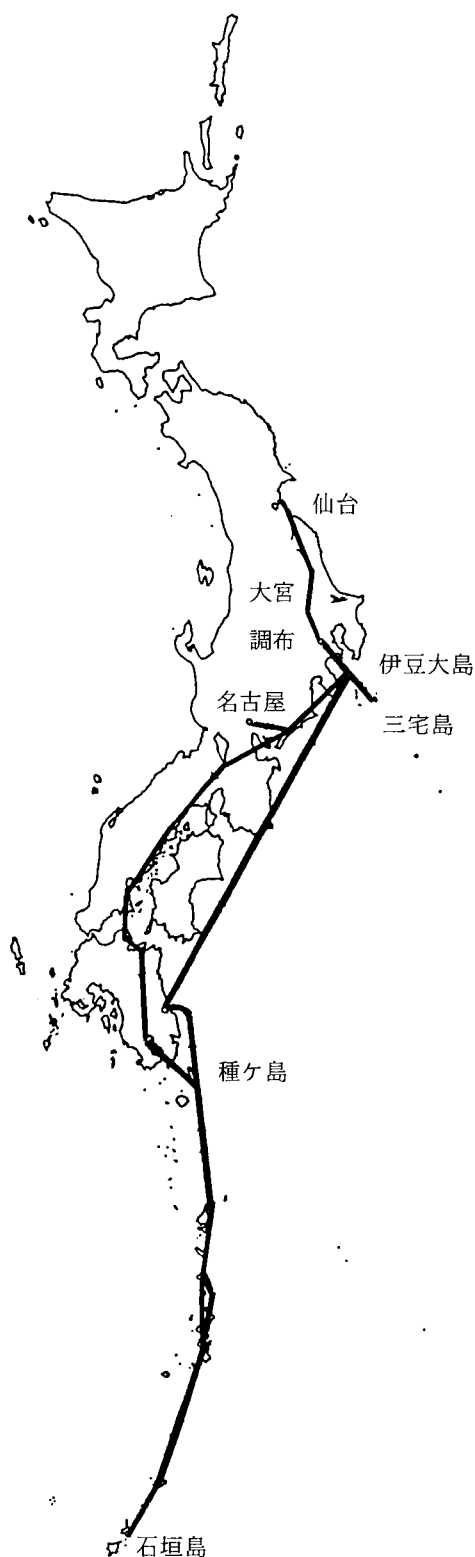


図5 飛行実験の経路

数が多く磁気テープへの転送時間がかかるため、3秒毎に行った。

2.1.4 実験用航空機および空中線

実験に使用した航空機は当研究所所有のビーチクラフト B99である。胴体上下にはLバンド用ブレード空中線が装備されており、これらは水平面内ではほぼ無指向性である。空中線の取り付け位置を図4に示す。以下、これらを各々、機体上部空中線、機体下部空中線と呼ぶ。実験に応じて一方の空中線のみをACAS実験装置に接続し信号の送受信に用いた。

2.1.5 実験の進行状況

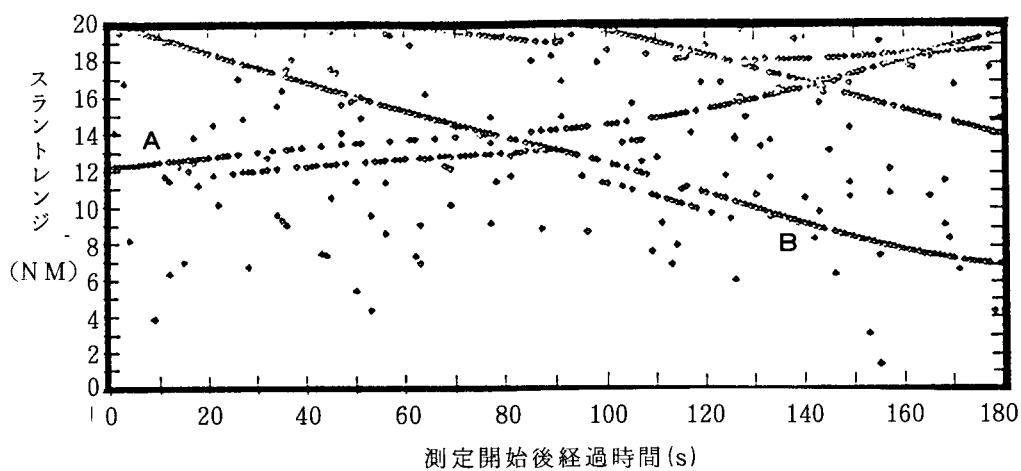
平成元年2月までに飛行実験を行った空域および航空路を図5に示す。図5に示した全航空路で波形測定を行った。また、調布・名古屋間、仙台・調布間、大宮・三宅島間では、トラフィックデータ取得のための位置測定を行った。位置測定値は、航空交通環境の分析およびACASアルゴリズムの試験データ等として使用する。また、波形データは、ACASが受ける混信妨害の分析およびACASデコーダの試験信号等に用いる。

2.2 実験結果

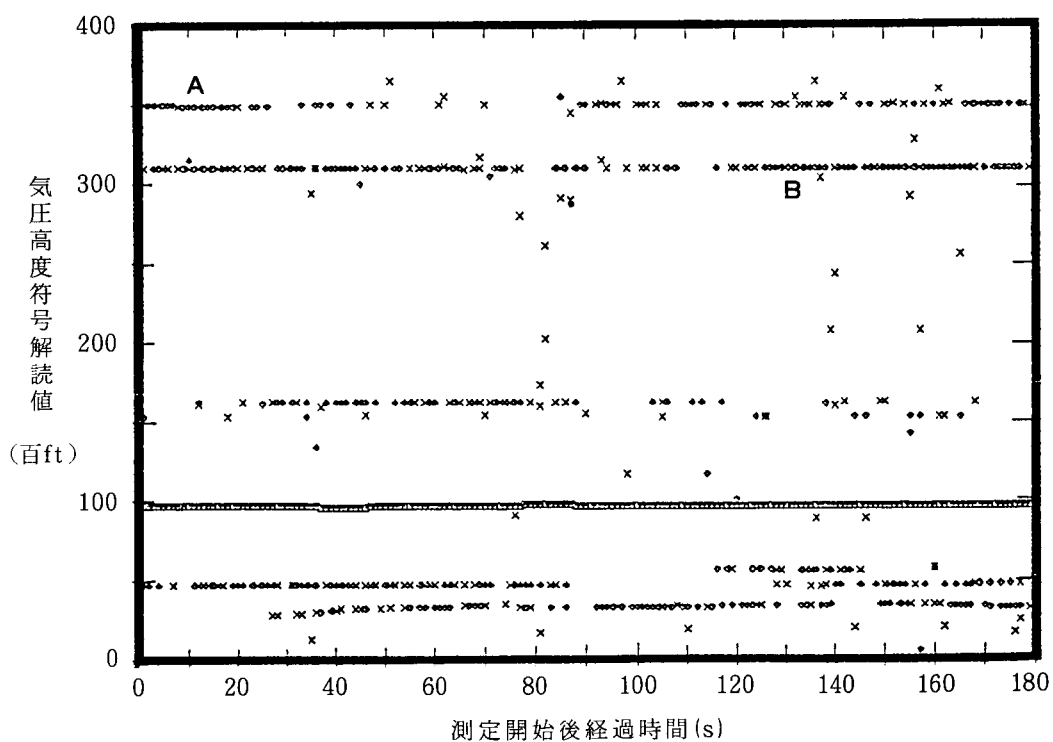
飛行実験は現在も継続中であり、環境調査結果をまとめるために十分なデータはまだ揃っていない。しかし、これまでに収集したデータを分析した結果には、報告例がまだ見あたらない種類の監視能力の低下が記録されていた。以下では、この現象に注目して実験結果の報告をする。

2.2.1 距離測定値の跳躍誤差

ACASインタロゲータのデコーダが出力する毎秒1回の位置測定値の生データを図6に示す。図6(a)の縦軸は距離データ(スラントレンジ)であり、図6(b)は応答符号から得られた高度データである。図の横軸はどちらも測定時刻である。この例では機体上部空中線を使用しており、実験用航空機は三宅島沖を高度9,500 ftで飛行中である。これらのデコーダの出力はACASの監視用トラッキングフィルタに入力されるデータになる。これらのグラフで一連の測定値のプロットが1本の曲線をなす場合、1機の航空機についての測定値



(a) 距離測定値



(b) 応答符号解読値 (気圧高度)

図6 約1NMの誤差を持つ位置データ
(三宅島沖高度9,500ftにて測定)

であると推定できる。図 6(a)にはこのような曲線にならないデータもあるが、これらは混信妨害や受信電力の低下等の理由で連続して測定できなかった航空機のデータまたはフールツ（他の S S R への応答信号が混入したもの）であると考えられる。

図 6(a)の10から14 NMの距離において、A および B で示した2機の航空機の距離測定値の一部が断続的に約 1 NM 近距離側へずれている。つまり、一連のデータの一部分が消失し、その部分に限って約 1 NM 近いところに測定値のプロットがみられる。A T C トランスポンダが質問信号を受信してから応答信号を送信するまでの応答遅延時間についてジッタの許容値は $\pm 0.1 \mu s$ 以内と規格に定められており⁽¹⁾、この距離のずれはその 100 倍以上（約 $13 \mu s$ に相当）であるためジッタとは考えられない。

図 6(b)にプロットされているこの2機の飛行高度は、31,000 ft および 35,000 ft である。約 1 NM 近くに測定されたデータに対応する気圧高度データは、距離のずれが発生する前後とは異なる値であり、気圧高度データには使用されないビットパターンであるためグラフにはプロットされていない。

この現象は、他の地点の他の航空機についても発生した。発生例を図 7 に示す。図 7 のデータは、伊豆大島沖高度 8,500 ft において機体上部空中線を用いて測定された。この場合は約 8 NM の距離で航空機 C の距離データのずれが発生している。また、同時に約 0.6 NM 遠いところにはマルチパス波とみられるプロットが所々に見られる。この航空機は、高度 28,000 ft から 31,000 ft に上昇中である。この場合も高度データが正しく得られていないため、距離がずれている部分は図 7(b)にプロットされていない。他の航空機との距離差が約 1.7 NM 以下の部分ではガブルによる符号ビット誤りが発生し得るが、距離のずれがある部分はこの外側であるため、ガブルが符号誤りの原因とは考えられない。

本文では上記のような誤差を跳躍誤差と呼ぶことにし、以下の考察を進める。

2.2.2 距離測定値の跳躍誤差の発生状況

これまでに得られている位置測定データから同

様な現象を探しだして次の方法で計数した。

1) 最初に、1本の曲線をなすデータ列を探し出す。

2) 次に、そのデータ列上の5回の測定中に距離データが2回以上欠落している部分を探し、欠落している部分を直線補間して推定位置を求める。この推定位置から 0.5 ~ 1.8 NM 近距離側の範囲に、データが欠落した部分の内2回以上位置データが測定された場合を探し出す。ただし、データの欠落が発生していないときにも近距離側に設定した範囲にデータが検出されている場合、および、近距離側のデータが他の航空機のデータの曲線に属する場合を除く。

3) 更に、その前後の位置データについて、同じ距離範囲で近距離側への距離のずれが発生している部分を探す。発生の間隔が6回の測定以内であればひとまとまりの1回の現象と見なす。

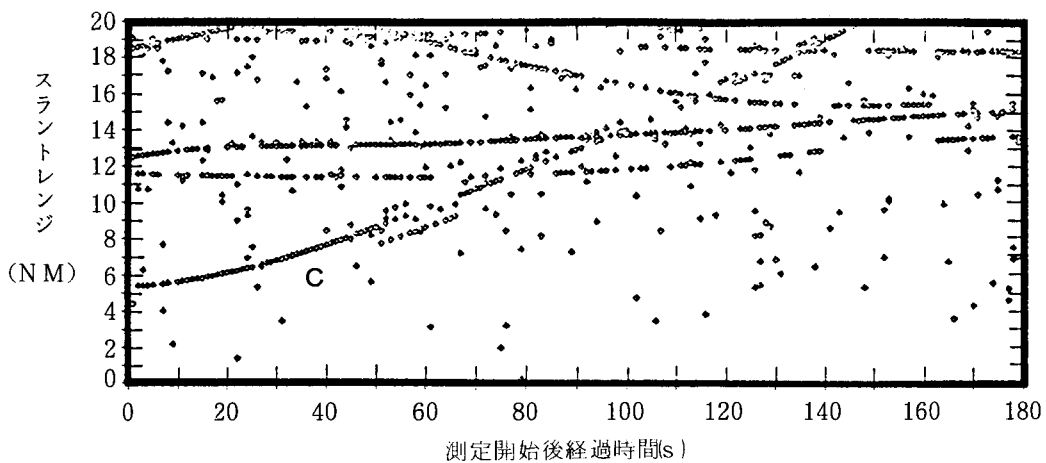
計数の結果、1回の現象における距離のずれはほぼ一定であり、ほとんどの場合は約 1 NM であった。約 1 NM 近距離側に距離測定値がずれる現象は1回あたり5秒から70秒の範囲で断続的に発生し、機体上部空中線を用いた400分間の位置測定データの内15回合計約6分間見られた。機体下部空中線を用いた50分間の位置測定データにはみられないが、機体上部空中線を用いた場合と比較して測定時間が短く飛行空域も異なるため、空中線による差については判断できない。

また、稀に距離のずれが約 1.3 NM の場合があり、機体上部空中線を用いた400分間の位置測定データの内2回合計約55秒間見られた。この例を図 8 に示す。このデータは伊豆大島沖高度 9,500 ft において機体上部空中線を用いて測定された。図の中央の接近中の航空機 D について、9 から 16 NM の範囲で約 1.3 NM のずれが発生している。この航空機の高度は 15,000 ft である。この場合にも距離がずれている部分の高度データは異常な値であり、図 8(b)にはプロットされていない。また、距離データの所々には、約 0.4 NM 遠方にマルチパス波と推定されるデータが測定されている。

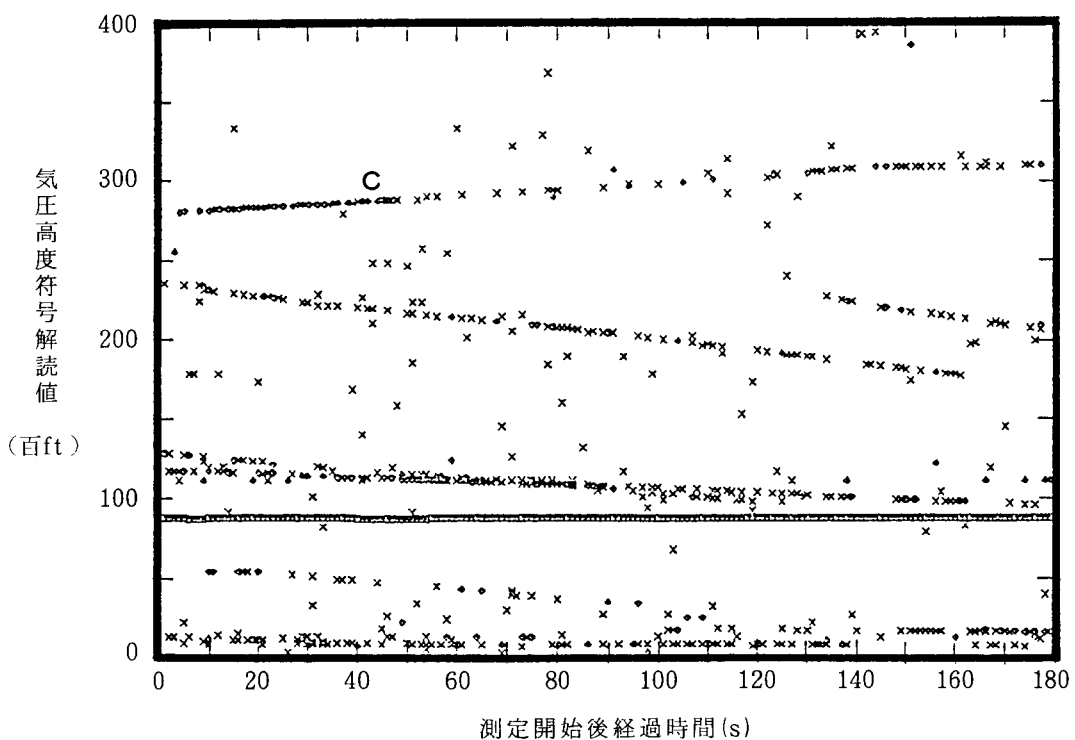
以上のような現象に共通な事項をまとめると次のようになる。

a) 一定した値の距離のずれ

どの場合も、推定された位置との距離のずれは一定であり、ほとんどの場合にこの値は 0.99 NM

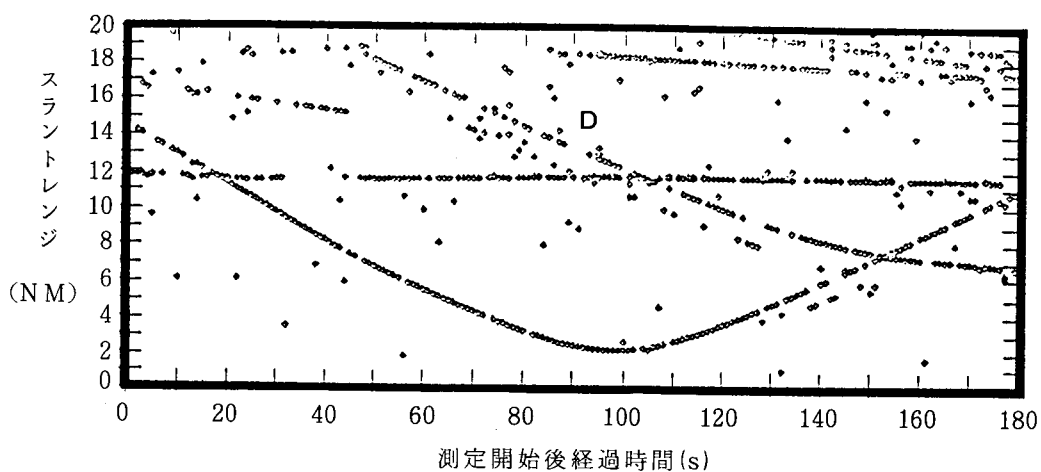


(a) 距離測定値

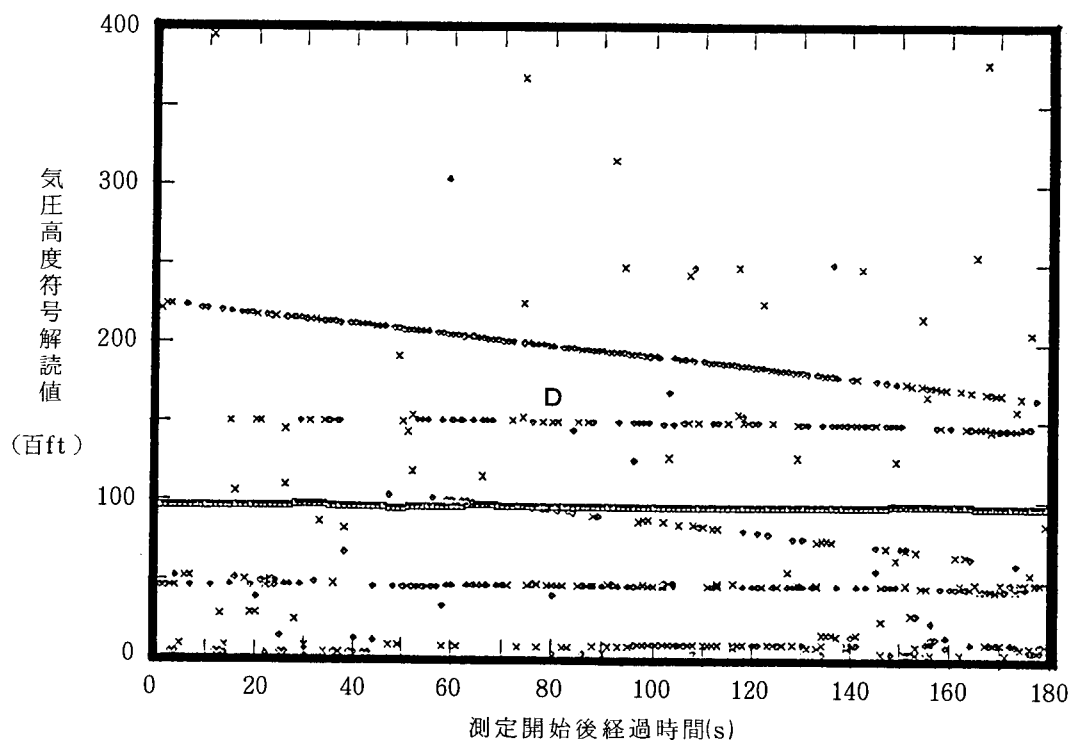


(b) 応答符号解読値 (気圧高度)

図7 約1NMの誤差を持つ位置データ
(伊豆大島沖高度8,500ftにて測定)



(a) 距離測定値



(b) 応答符号解読値 (気圧高度)

図8 約1.3 NMの誤差を持つ位置データ
(伊豆大島沖 9,500 ft にて測定)

から1.10 NMである。稀に1.28 NMから1.43 NMになる場合もあった。このように、距離のずれは約1 NMまたは約1.3 NMのどちらか一方の値を取り、両者が混在した例は測定されていない。

b) 異常な応答高度データ

距離がずれているときの応答データは、ずれが発生していない場合とは異なる値である。一般の航空機では飛行できない高度データが応答される場合もあり、また、気圧高度符号には用いられないビットパターンになる場合もある。

c) 遅延時間が同じマルチパスの発生

この現象がみられる場合は、同時にマルチパスによると考えられる疑似応答データも測定されることがある。約1 NMのずれが発生している場合、マルチパスによる疑似応答の位置はどの場合も約0.6 NM遠い位置である。図6及び図7にみられる疑似応答データも約0.6 NM遠い位置に発生している。約1.3 NMのずれの場合については、ずれの発生例が少ないが、約0.4 NM遠い位置にマルチパスが観測されている。

d) 海上で発生

これまでの実験については、この現象は陸上で観測されていない。

3 原因の推定

前述の現象の原因を推定するために、原因の候補をいくつか検討する。次に応答信号受信波形データを処理した結果について考察し、類似の現象についての文献調査の結果をまとめる。これらを基にして、最も可能性が高い原因について考察する。

3.1 推定される原因

先にまとめたいいくつかの性質から、この現象の原因として次の各項を推定することができる。

a) 機器の異常

ACAS実験装置の異常、ATCトランスポンダの異常等が推定される。

b) 電波伝播上の問題

質問信号に発生したマルチパス波により複数の質問信号が重なった状態でATCトランスポンダに受信され、トランスポンダが質問信号のモードを誤認したことが推定される。

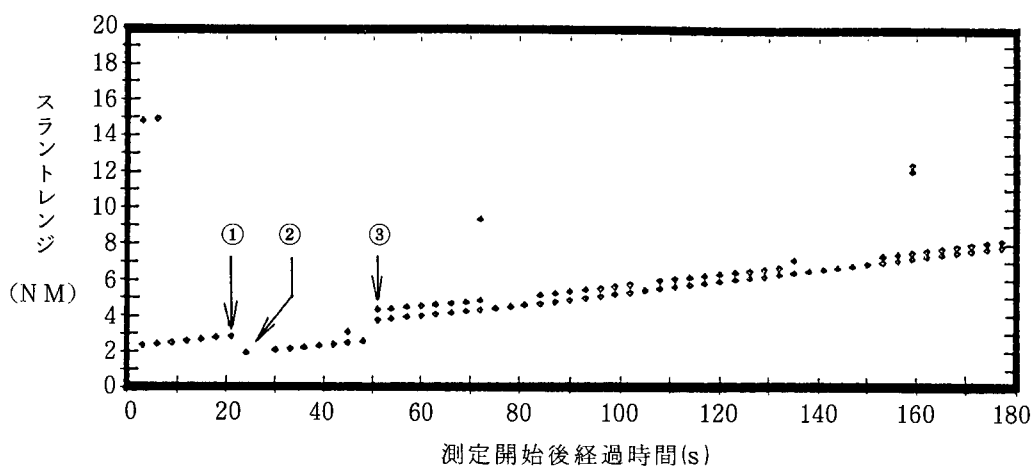
c) 特殊な状況のガブル

ACAS実験装置のデコーダは、前後から他の応答信号がガブルしている応答信号を検出しない場合がある。デコーダはフレーミングパルスの間隔(20.3 μ s)で受信されるパルスを検出することによって応答信号の解読を開始するが、その前後の状況から疑似応答信号の可能性があると判断される信号のデータは出力しない。例えば、複数の応答信号が1.45 μ sの整数倍に近い間隔で受信された場合、これらに属する符号パルスがフレーミングパルスの間隔に近い間隔を持つ場合があり、疑似応答信号が多数発生する。誤ったデータが多数入力されるとACASが必要なデータを処理できなくなる場合がある。このため、疑似応答信号を除去する目的でデコーダは前述のようにデータの一部を捨てることがある。このような特性を考慮すると、次のような場合が原因として推定される。実験装置から見てある航空機の約1 NM近距離の位置を飛行する別の航空機から小電力の応答信号が受信され、これがときどき実験装置のデコーダに入力される場合を考える。このとき、近距離側の応答信号と遠距離側のマルチパス波にはさまれた応答信号は、疑似応答信号と見なされて検出できない場合がある。また、近距離側にある応答信号が検出されても、マルチパス波の混信またはガブルによりビット誤りが発生すると考えられる。

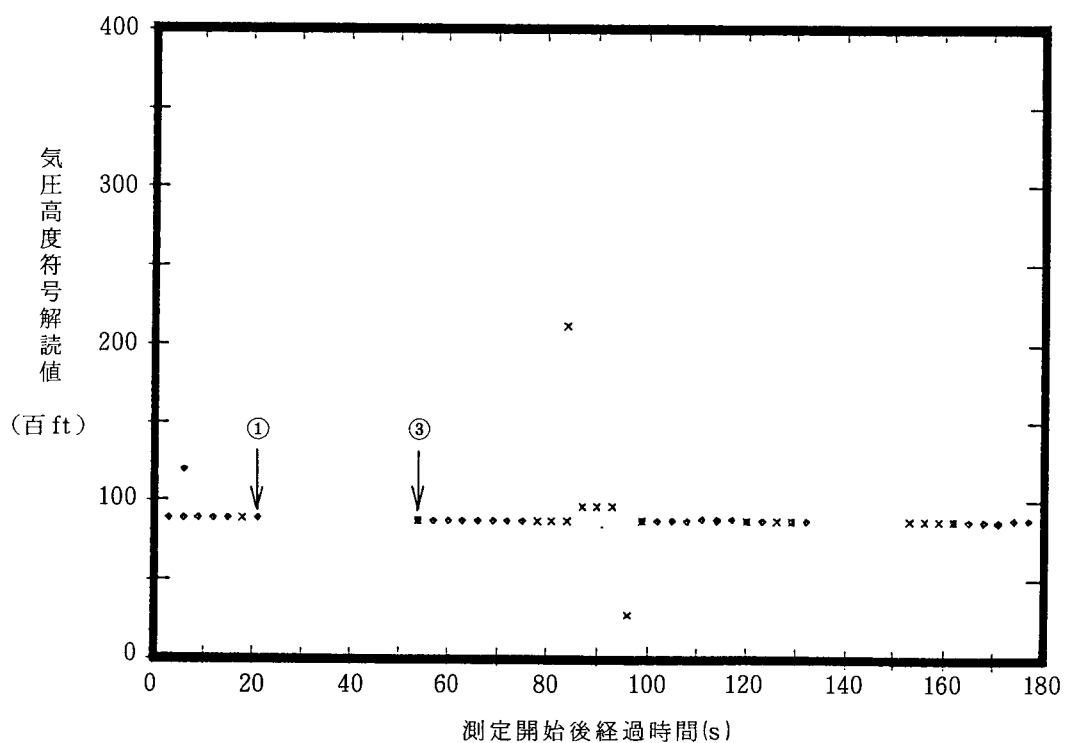
a) からc)の他に、他のSSRの質問信号がACAS実験装置のものより先にATCトランスポンダに受信される場合も考えられるが、前述のデータのように数秒間以上ほぼ一定の距離差のデータが連続するためには混信のタイミングを安定させる条件が必要になる。また、他のSSRの質問信号とACAS実験装置の質問信号が混信する場合も考えられるが、これも同様に混信のタイミングを安定させる条件が必要になる。

3.2 受信波形データの処理

この現象の原因を知るためには受信機およびデコーダに入力される信号を知る必要がある。しかし、位置測定と同時に波形測定を行えなかったため、上記の現象が発生しているときの波形データはない。そこで、別に測定した受信波形データを用いて検証を行った。



(a) 波形データから求めた距離



(b) 波形データから求めた応答符号解読値 (気圧高度)

図9 波形データから求めた位置データに見られる約1 NMの誤差
(種ヶ島沖高度10,000 ftにて測定)

最初に、ACAS実験装置のデコーダのソフトウェアモデルを電子計算機上で作成し、これに受信波形データを与えて位置測定データに変換した。この過程で上記の現象の発生を確認した。更に、そのときの受信波形をプロットし、ACAS実験装置の受信機に入力される信号を調べた。

今回の現象の検出および計数には、位置測定データと同じ方法（2.2.2参照）を用いた。また、この現象の発生から終了までの継続時間の他に、ACAS実験機と相手機の位置関係等を調べた。その結果、位置測定データの場合と同様な距離データのずれが検出された。約1NMのずれについては、機体上部空中線を使用した560分間に10回合計132秒間、機体下部空中線を使用した90分間に6回合計150秒間、各々上記の現象の発生がみられた。距離のずれは0.93NMから1.13NMの範囲で発生した。一方、距離のずれが約1.3NMの場合については、機体上部空中線を使用したときに1回9秒間発生した。このときのずれは1.25NMから1.29NMの範囲にあった。

波形データから求めた距離測定値が約1NMずれた例を図9に示す。このデータの測定は種子島沖の太平洋上高度10,000ftで行われ、信号の送受信には機体下部空中線を使用している。図9には、実験用航空機を追い越したYS11のデータがプロットされている。実験中の視界は良好であり、このYS11を視認できたが他には航空機を見つけることはできなかった。受信波形データは3秒毎に1回測定されるため、図9も3秒毎にプロットされている。測定値がずれた部分から後のデータには、マルチパス波によると推定されるデータも約0.6NM遠距離側にプロットされている。

図9の①～③で示した各時点の受信波形を図10に示す。これらはACAS実験装置の受信機Logビデオ信号波形であり、図の縦軸は信号電圧で単位はV、横軸は応答信号受信開始後経過時間で単位は μs である。受信機の入力電力は、ビデオ信号の電圧が0.1Vのとき-75dBm、0.5Vのとき-32dBmに各々対応する。また、応答信号のF₁パルスの前縁が図の横軸で0 μs の位置にあるとき、その信号を送信したトランスポンダの距離は0NMである。

図10(a)は図9(a)の①の時点の受信波形であり、F₁パルスの前縁が35 μs の位置にあるため距離

は2.83NMであることがわかる。応答符号パルスはA₂、A₄、B₁、B₂、C₂、およびC₄が受信されており、YS11の気圧高度が8,900ftであることを示している。応答信号に続いて、ノイズ状のマルチパス波がみられる。

図10(b)は、距離測定値が約1NM近くなった図9(a)の②の時点の波形である。この図では補間による推定値より約13 μs 早く応答信号が受信されており、約1NM近距離側へのずれと一致する。また、応答符号も図10(a)とはまったく異なっており、A₄、B₁、B₂、B₄、C₁、C₄、およびD₁の各パルスが受信されている。C₁およびC₄ビットが同時に1であるため気圧高度符号としては異常である。この応答信号の8.5 μs 後には、同じパルスパターンで約0.8V低い電圧の信号が検出されている。これは、前述の応答信号のマルチパス波であると考えられる。図10(b)からは、図10(a)の場合と同じまたは隣接した高度データを表すパルスパターンを見いだすことはできない。

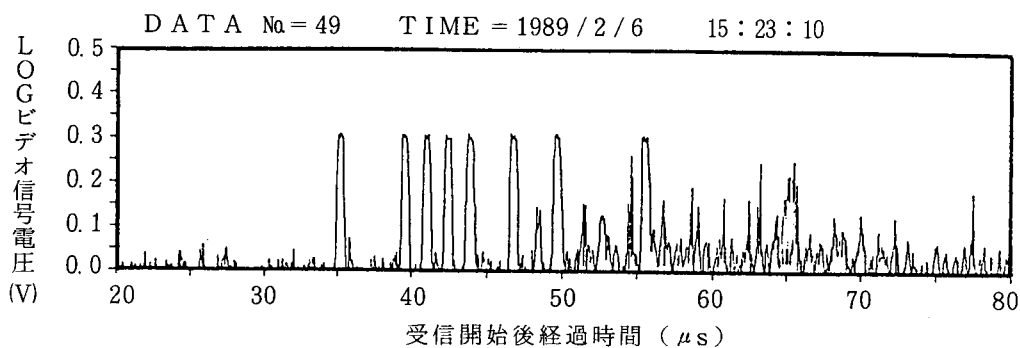
図9(a)の③の時点で距離測定値が正常な値になり、応答符号が示す気圧高度は8,800ftである。このときの受信波形である図10(c)でも再び応答信号の位置および符号は正常で、A₂、A₄、B₁、B₂、およびC₄パルスが受信されている。この場合もパルス状のマルチパス波が7.1 μs の遅延時間で受信されている。

3.3 原因の推定と考察

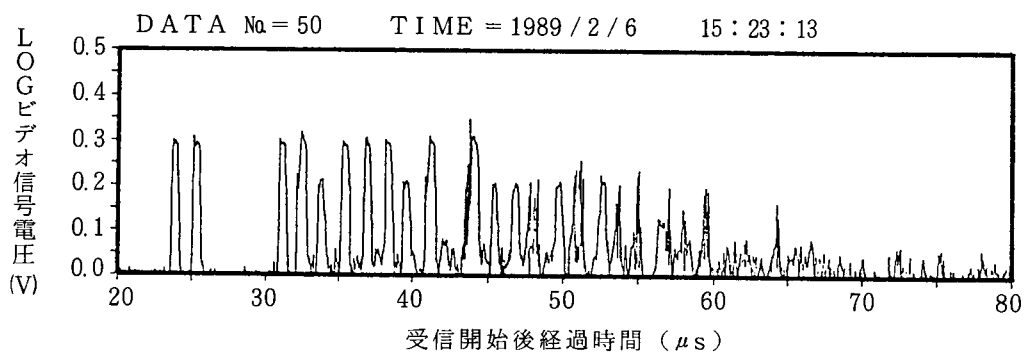
3.3.1 波形データの処理結果の考察

波形データより、この現象の原因は、ACAS実験装置の受信系統の問題や特殊な状況のガブルではないことがわかる。図9のように、この現象が観測される場合の波形データには約1NM（約13 μs ）近距離側に異なる符号を持つ応答信号が記録されており、あるべき所には応答信号が記録されていない。実験装置のデコーダはこれをそのまま解読したものと考えられる。符号データの誤りについても、記録されている波形からマルチパスやガブル以外の原因であることが推定できる。

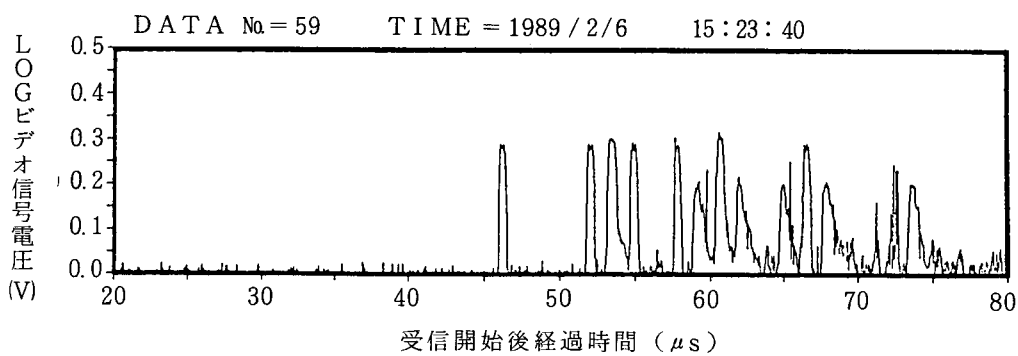
また、距離測定値のずれが発生していない時点の受信波形データには、図9の例では、YS11からの応答信号およびそのマルチパス波と若干のフ



(a) 図 9 ①の受信波形



(b) 図 9 ②の受信波形



(c) 図 9 ③の受信波形

図 10 応答信号受信波形

ルーツ以外に応答信号の波形が記録されていないため、ACASの近くにはATCトランスポンダを搭載した航空機がこのYS 11以外に飛行していなかったと考えられる。このため、特殊な状況でのガブールも原因としては不適當である。

図10の波形データには応答パルスの受信後にノイズレベルの上昇または応答信号と同じパルスパターンの信号が見られるが、これらはマルチパス波であると考えられる⁽⁶⁾。図10 (b)および(c)では応答信号と同じパルスパターン⁽⁶⁾の信号が遅れた位置に受信されており、応答信号からの遅延時間は各々8.5 μ s 及び7.1 μ s である。2機の航空機 (ACAS搭載機およびATCトランスポンダ搭載機)の高度を h_1 および h_2 とし、スラントレンジを s とすると、鉛直面内で発生する海面反射マルチパス波の遅延時間 d は、光速を c として、

$$d = \{ (s^2 + 4 h_1 h_2)^{1/2} - s \} / c \quad (1)$$

になる (図11 参照)。この鉛直面内のモデルによる計算結果が海上で実測値とよく一致することは、実験により確認されている⁽⁶⁾。図10(c)について計算すると、相手機の高度8,800 ftおよびスラントレンジ3.72 NMと実験用航空機の高度10,000 ft から計算される海面反射マルチパス波の遅延時間は6.9 μ s である。ここで用いた気圧高度の値は100 ft 単位で量子化されており、更に気圧高度計にも測定誤差が発生し得る。また、スラントレンジ測定値も、ATCトランスポンダの応答遅延時間の公差 $\pm 0.5 \mu$ s に対応する ± 0.08 NMの誤差を持つ。このためマルチパス遅延時間の計算値は約 $\pm 0.3 \mu$ s の誤差範囲を持ち、前述の計算値6.9 μ s は図10(c)の測定値7.1 μ s とよく一致しているといえる。

図10(b)についても測定された波形から算出される位置より約1 NM遠方に航空機があると仮定すれば、遅延時間の測定値と計算値が一致する。波形データから求めた距離データに約1 NMのずれが発生したその他の例についても、その波形データには必ず図10(b)と同様なパルス状のマルチパス波が記録されていた。これらの場合のマルチパス波の遅延時間は必ず7~9 μ s の範囲にあった。例として、ACSA実験装置を搭載した実験用航空機の飛行高度が10,000 $\pm$ 500 ft の場合の波形

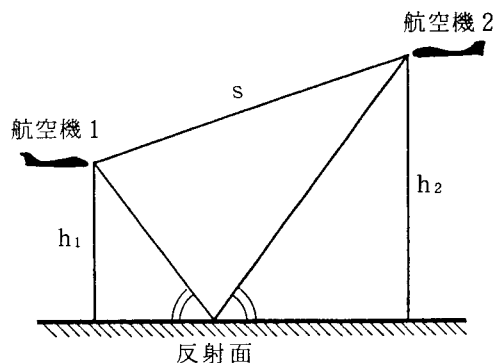


図 11 鉛直面内のマルチパス

データを処理した結果について、約1 NMの距離のずれが発生した相手機の位置の範囲と対応するマルチパス遅延時間の計算値を図12に示す。

3.3.2 文献に見られる類似の現象

今回の現象と類似の現象について文献調査をしたところ、米国で行われた飛行実験の報告書には質問信号に発生したマルチパスの影響の例があった⁽⁸⁾。また、地上に設置されているSSRについてもよく似た例が報告されている⁽¹⁰⁾。

報告書(8)は、リンカーン研究所が初期の形式の衝突防止装置BCASを用いて飛行実験した結果をまとめたものである。実験装置は、空中線切り替えや8段 Whisper / Shout 質問方式を採用し

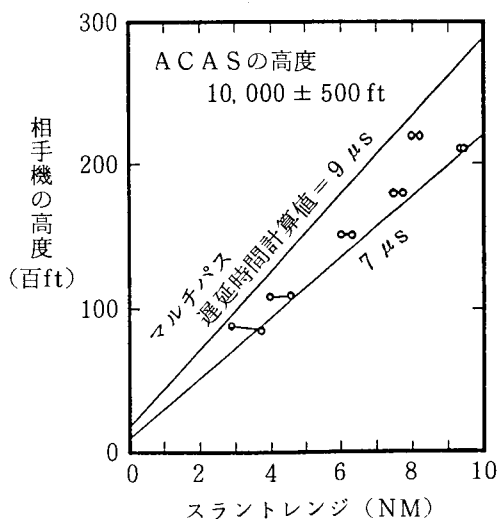


図12 距離データが約1 NMずれた位置

ている。この実験では、ガース以外の原因で航空機のデータが消失した例が2種類記録されていた。この内の一方は海上で発生しており、質問信号のマルチパス波が約 $2\mu\text{s}$ の時間差でATCトランスポンダに受信されたためと推定されている。この例では、必要なデータが消失するのみで誤ターゲットの発生は見られない。

一方SSRの場合は、無指向性のSLS空中線から送信される P_2 パルスのマルチパス波が約 $11\mu\text{s}$ の遅延時間でATCトランスポンダに受信され、異常な符号を持つ応答信号がSSRに受信された例が報告されている⁽¹⁰⁾。

3.3.3 航空機上で観測されるマルチパス

航空機上で観測されるマルチパスの性質については、米国のリンカーン研究所の飛行実験結果が発表されている⁽⁶⁾。この実験では、同じ高度で様々な方向に飛行する2機の航空機間でパルス変調した $1,030\text{MHz}$ の電波を送受信し、マルチパス波の電力等を測定している。この周波数はSSRやACASの質問信号に使用されている。

この実験において、海面や砂漠等の滑らかな反射面からパルス状のマルチパス波が高い頻度で受信された。ATCトランスポンダの空中線は通常胴体下部に取り付けられており、空中線の指向性パターンは水平面より下方向約 $20^\circ\sim 30^\circ$ にメインビームを持つ⁽⁹⁾。このため、ほぼ水平方向の航空機よりも斜め下方向の海面等の反射面に向けて放射される電力が大きくなる。リンカーン研究所の実験⁽⁶⁾によれば、両方の航空機が機体下部空中線を使用した場合には海面反射マルチパス波が直接波と同等の電力で受信されることが確認されている。また、一方が機体上部空中線を使用した場合は、海面反射マルチパス波の平均電力が直接波の $10\sim 20\text{dB}$ 下になる結果が得られている。

一方、反射面が森林地帯や市街地等の荒い表面である場合は、マルチパス波の受信波形が比較的低電力のノイズ状になりパルス状になることがほとんどない。 $1,090\text{MHz}$ の応答信号を測定した我々の実験においても、森林や都市の上空で観測されるマルチパス波はノイズ状のものが主であった。

以上より、質問信号とともにその海面反射マルチパス波が、ATCトランスポンダのMTL

(Minimum Triggering Level)を越えるパルス波形で受信されることがわかる。また、森林等の荒い地表面からのマルチパス波が十分な電力のパルスとして受信される頻度は少ないと推定できる。

図10に示したように、今回の現象が発生するときには応答信号受信波形にマルチパス波が観測されている。ATCトランスポンダは、 $1,030\text{MHz}$ の質問信号を受信し、 $1,090\text{MHz}$ の応答信号を送信する。両信号の周波数比は 1.06 であり、マルチパス波の性質を決める要因である反射面の荒さおよび媒質定数はどちらの信号についても同程度とみなすことができる。航空機に搭載した空中線の指向性も、細かいピークやディップ等の方向がずれる可能性があるが、全体的な傾向に大きな差は無いと推定できる。また、反射面の状態については、質問信号の送信から応答信号の受信までの間に反射状態を大きく変えるような変化はないと推定できる。従って、応答信号にマルチパスが発生している場合には、多くの場合質問信号にも同様に発生していると推定できる。

3.3.4 ATCトランスポンダの特性

図12に示したように、マルチパス波の遅延時間が $7\sim 9\mu\text{s}$ の範囲に今回の現象が多く発生している。この遅延時間の値は図2(b)に示した現用SSRのモードA質問信号のパルス間隔とほぼ等しい。ATCトランスポンダの性質についてまとめ、両者の関係を考察する。

抑圧されていないATCトランスポンダは、十分な電力で受信された質問信号のパルス間隔が $8\pm 0.5\mu\text{s}$ の範囲にある場合にはモードA応答信号を送信し、 $8\pm 1\mu\text{s}$ の範囲にない信号には送信しない⁽¹⁾。つまり、 P_1 パルス等と同じ波形の十分な電力を持つパルスが $8\pm 1\mu\text{s}$ の範囲の間隔で受信された場合には、ATCトランスポンダはモードA応答信号を送信する可能性がある。また、質問信号を検出してから応答信号の送信を終了するまでの間は、質問信号を受け付けない。ゆえにモードC一括質問信号に他のパルスが重なってモードA質問信号として先に誤解釈された場合、後に続く P_3 パルス等は無視されモードA応答信号の送信が行われる。

応答信号の送信は質問信号の P_3 パルスの前縁

から $3 \pm 0.5 \mu\text{s}$ 後の範囲内に定められる時点を中心に開始される。ある A T C トランスポンダに注目すれば、この応答遅延時間のジッタは $\pm 0.1 \mu\text{s}$ 以下である。また、異なる応答モードについても、応答遅延時間の差は $\pm 0.1 \mu\text{s}$ 以下である。ゆえに、質問信号のマルチパス波が約 $8 \mu\text{s}$ 遅れて受信された場合、その P_1 パルスを P_3 パルスと誤認したならば $21 \mu\text{s}$ のパルス間隔を持つモード C 質問信号に対するよりも約 $13 \mu\text{s}$ 早く応答信号が送信され距離測定値が約 1 NM 近い値になることが推定される。このときの A T C トランスポンダの送受信信号を図13に示す。

一方、軍用の I F F（敵味方識別装置）トランスポンダは、民間用の A T C トランスポンダが使用しないモード 1 および 2 の信号等も受信し応答信号を送信する。モード 2 の質問信号は、質問パルスの間隔が $5 \mu\text{s}$ である以外、パルス波形等がモード A / C と同じである。このため、A T C トランスポンダと同様に I F F トランスポンダもモードを誤認するならば、質問信号に発生したマルチパス波の遅延時間が約 $5 \mu\text{s}$ になったとき応答信号はモード C の場合より約 $16 \mu\text{s}$ 早くなり、距離測定値は正しい位置より約 1.3 NM 近いところへずれることになる。

マルチパス波を伴う質問信号に対して誤動作をしないように、A T C トランスポンダには受信機の感度低減機能がある。この機能は、十分な幅と

電力を持つパルスが受信されたときに受信機の感度を低下させ、不要なパルスが M T L を越えて受信される頻度を低下させるものである。これにより、M T L はパルス受信電力の約 9 dB 下まで上昇する。低下した受信機感度の回復は $1 \mu\text{s}$ あたり約 3 dB である。しかし、前述のように海上では直接波とマルチパス波がほぼ同じ受信電力になる場合がある。また、受信電力が低く M T L に近くなる場合もあり、感度低減が行われないこともある。更に、マルチパス遅延時間が長くなると、一旦低減した感度はマルチパス波が受信されるまでに回復する。これらの場合には、感度低減機能が十分に効果を発揮できない。

3.3.5 推定される原因

以上の考察より、今回観測された位置データの跳躍誤差は次のような原因によって発生したと考えられる。A C A S の質問信号とともにそのマルチパス波が十分な電力を持つパルス状の波形で A T C または I F F トランスポンダに受信され、トランスポンダが P_1 パルスのマルチパス波を P_3 パルスと誤解釈することによって質問モードを誤認したと推定できる。このため応答信号を送信するタイミングが早くなり、距離測定値が近距離側にずれる。また、応答符号もモード C とは異なるものになる。このときの A T C トランスポンダの送受信信号は図13のようになる。今回の現象が陸

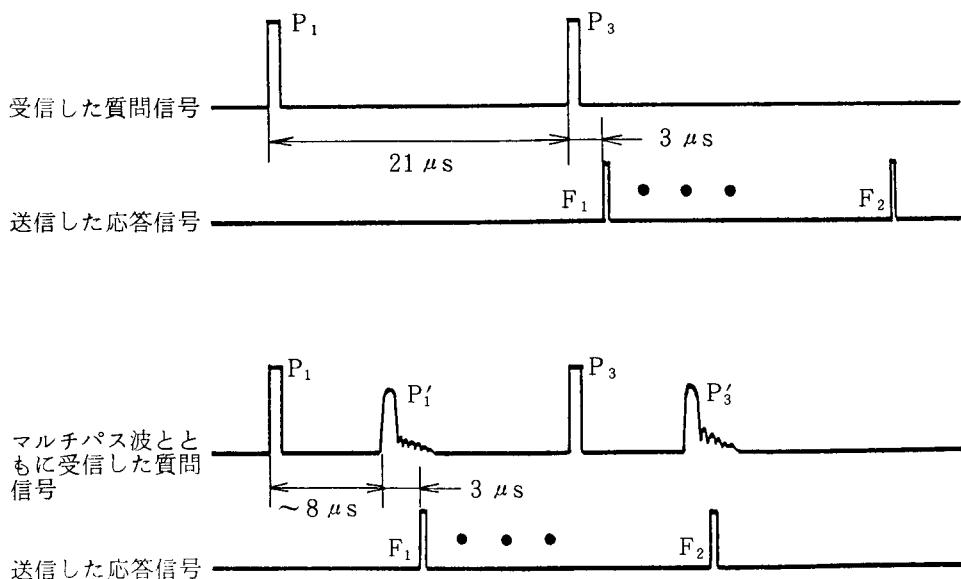


図13 A T C トランスポンダの送受信信号 (P_4 は省略)

上ではほとんど観測されず主として海上で観測されたことは、文献(6)のマルチパス波の受信電力および波形についての実験結果から予測される結果と一致する。

4 ACAS の性能への影響

2.2 の実験結果に見られた現象がACASの性能に与える影響について考察する。最初にこの現象がACASに入力される信号に与える影響をまとめ、次にACASの各機能毎にその影響を考察する。最後に、実用型ACAS⁽²⁾に用いられる技術が今回の現象の影響を軽減できる可能性について考察する。特にこの現象の発生率に影響すると予測される Whisper / Shoutの使用について考察し、実用型ACASにおける今回の現象の発生率を予測して性能への影響を概算する。

4.1 ACAS の入力データの誤り

ACASのデータ処理の流れの内、相手機的位置データに関わる部分を図14に示す。図の監視用トラッキングフィルタは、測定された位置データから各航空機に対応するデータを選出する。一方、ACASアルゴリズムは、各航空機的位置データを用いて危険検出・回避判断等の処理を行う。このためACASは監視用および回避判断処理用の2種類のトラックを持っており、各々の目的はトラックファイルの生成・維持および今後の相手機位置の予測である。誤った入力データに対するこれらのトラックの動作が問題になる。

今回見いだされた現象によってACASが測定した航空機位置データには次のa)～e)のような誤りが発生する。

a) 距離データの誤差

正しい距離測定値が得られない。多くの場合約1NM近い方にずれるが、ずれる距離は安定した値である。

b) 応答符号の誤り

異なるモードの応答符号が検出される。気圧高度符号と同じビットパターンのモードA符号が割り当てられない限り、得られる応答符号は正しい気圧高度を示さない。また、該当機のパイロットによるモードA応答符号の変更がない限り、ATCトランスポンダの応答符号は一定である。ただし、大電力のマルチパス波により符号誤りが発生する場合があります、解読される応答符号が常に一定の値とは限らない。

c) 発生頻度

ATCトランスポンダのモード誤認の発生頻度については十分なデータが得られていないが、先に推定した原因によれば、マルチパス波の受信電力分布がこの現象の発生率に影響すると予測できる。前述の検出方法では連続したモード誤認と判定する間隔を6回の測定期間以内に次の誤認が発生することとしたが、これまでのデータによればモード誤認発生中と判定された区間内のモード誤認率は60～70%であった。これは、比較的連続して発生する傾向があることを示している。

d) 継続時間

トランスポンダのモード誤認の継続時間については、相互の飛行形態によって異なる。例として、ACASとほぼ同高度の航空機について両者とも水平飛行するときこの現象が発生する場合を考える。式(1)より、スラントレンジsは、

$$s = \{ 4 h_1 h_2 - (cd)^2 \} / (2 cd) \quad (2)$$

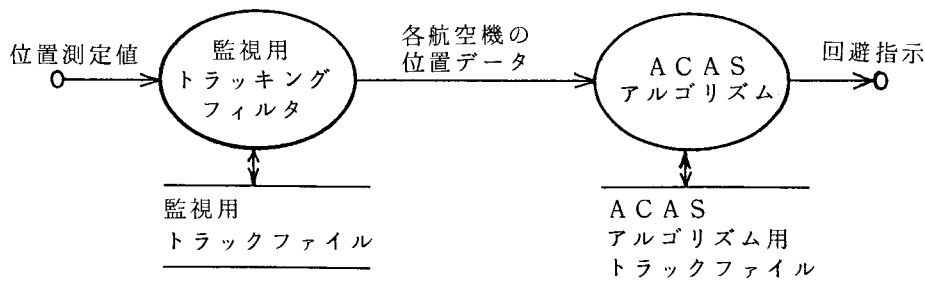


図14 ACASの位置データ処理の概要

として求められる。この式を用いて、両者の高度 h_1 および h_2 が等しい場合について計算した結果を図15に示す。モードの誤認が発生するマルチパスの遅延時間 d の範囲を $7.0 \sim 9.0 \mu s$ とすれば、海面からの高度が 10,000 ft の場合、対応するスラントレンジ s は 2.99 ~ 4.22 NM の幅 1.23 NM の範囲になる。相対速度が 500 kt と仮定すると、モードの誤認が継続する可能性がある時間は 8.8 秒間である。また、式(2)よりこの継続時間は高高度で長くなることがわかる。接近速度を 500 kt に仮定して、質問モードの誤認が継続し得る時間を計算した結果を図16に示す。

図16の2本の曲線は、質問モードの誤認が発生し得るマルチパス遅延時間 d の範囲を最小の $7.5 \sim 8.5 \mu s$ および最大の $7.0 \sim 9.0 \mu s$ とした場合について表している。図15によれば、同高度の航空機間については、ACASのシステムレンジである 14 NM 以内において 20,000 ft 以下の高度でモードの誤認が発生している。このとき接近速度が 500 kt である場合、図16より約 32 秒間モードの誤認が継続し得ることがわかる。

ACAS搭載機と相手機との高度差が大きい場合、図12に記入したように相手機の高度が高いほどモードの誤認が発生し得る領域が広くなりかつ遠方になる。また、相手機が降下しながら接近する場合、モードの誤認が発生し得る位置関係になる時間が長くなる場合があることもわかる。一方、相手機がACASより低高度から接近する場合には、モードの誤認の継続時間は短くなるが、回避指示が発生している最中（最接近まで 25 秒以内）になる可能性がある。このように、モードの誤認が発生し得る時間や時期は相手機との位置関係や各航空機の飛行形態によって変化するが、場合によっては回避指示発生的前後に数十秒間発生し得ることがわかる。

e) 発生位置

モードの誤認は海上で多く発生している。欧州および米国のように航空路および空港の多くが内陸にある場合には大きな問題にはならないと考えられるが、日本等の島国の場合は海上・海岸周辺に航空機密度が高い主要な空域があるため他国と比較してモードの誤認の発生率は高く影響が大きいと予測される。

このような特徴をもつ誤った位置データがAC

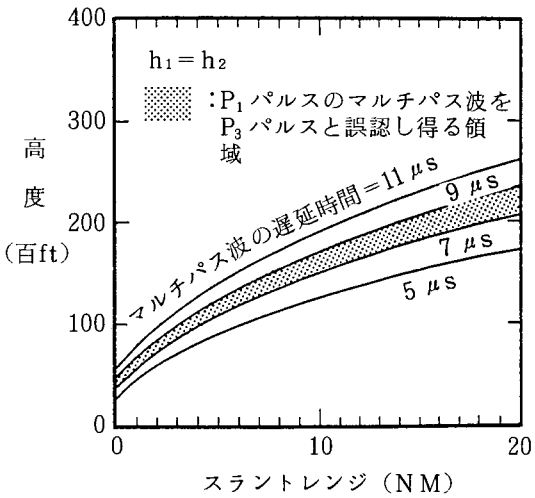


図15 同高度の航空機間で観測されるマルチパス波の遅延時間

ASの監視用トラッキングフィルタに入力される。更に、そこで処理した結果は位置推定に用いるACASアルゴリズム用トラックで処理される。

4.2 監視用トラックファイルへの影響

実用型ACASの監視用トラッキングフィルタの例⁽²⁾について考える。監視用トラッキングフィルタの目的は、定期的に測定される位置データの時間的な相関を確認し、フルーツ等不要なデータを除去しトラックファイルを生成・維持することである。

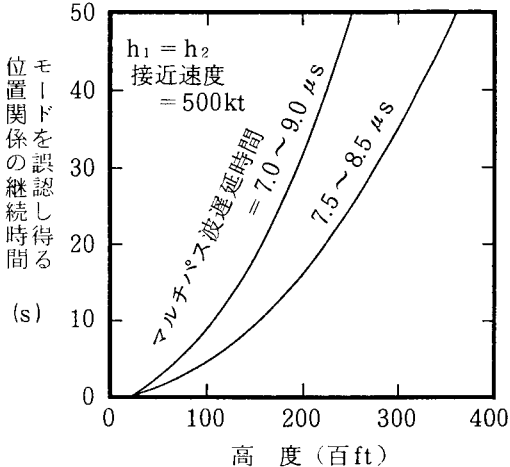


図16 同高度を水平飛行する航空機間でモードを誤認し得る位置関係の継続時間

トラックファイルの維持は、距離データ及び高度データについて $\alpha\beta$ トラックで求めた予測位置に相関窓を設定し、窓の中のデータの有無によって行う。連続して6回以上窓の中にデータが得られない場合は、そのトラックファイルを消去する。

トラックファイルの維持に用いる距離相関窓の大きさは相手機との距離やトラックファイルの状態によって変化し、予測距離が0.17 NM 以上の場合、 ± 0.09 NMから ± 0.78 NMである。このため、距離データに約1 NMのずれが発生すると別の航空機からの応答とみなされる。

気圧高度の相関窓幅は ± 200 ftであるが、応答符号のビットパターンを比較している。このため、気圧高度符号に用いられないビットパターンであっても、それが連続して受信された場合には相関があると判定される。

一方、ACASが維持できるトラックファイル数には限りがあるため、近距離のものから優先順位を与えて維持している。

トラックファイルを生成する捕捉処理では、3回連続して得られた位置データを用いる。最初の2回のデータから線形外挿して予測した3回目の距離を中心に ± 0.05 NMの距離相関窓を設定し、これを用いて相関を持つものを選出する。更に、応答符号のビットパターンの一致状況を調べ、トラックファイルを生成する候補を選出する。その後5回の位置測定の際に4回目のデータがトラックファイル維持用の相関窓の中に検出された場合はトラックファイルを生成する。また、この間に生成されなかったトラックファイルの候補を捨てる。

維持されているトラックファイルに相関がある位置測定値は、そのままACASアルゴリズム用トラックに出力される。相関がある測定データが得られずトラックファイルがコースト状態である場合は、これを示すフラグが出力される。

このトラッキングフィルタの性質から次のことがわかる。

a) トラックファイルの消失とコースト状態

モードの誤認の発生回数が連続して6回以上の場合、正しい位置データを持つトラックファイルは消去される。モードの誤認の連続した発生回数が5回以内の場合では、トラックファイルがコースト状態で維持される場合と消去される場合があ

る。ガーブル等の別の原因によって該当するトラックファイルが既にコースト状態であれば、モードの誤認の発生回数が少なくてもトラックファイルが消去される場合もある。

b) 誤トラックファイルの生成

モードの誤認の発生がトラックファイル生成基準を満たす回数になった場合、ガーブル等他の混信がなく符号ビットパターンが安定して受信される場合は誤トラックの発生が予測される。トラックされる気圧高度の値は、モードA 応答符号を解読したものであるため安定している。距離データも前述のように正しい値ではないが、正しい位置からほぼ一定のずれを持つ。このため、生成された誤トラックファイルは、相関処理によって消去されにくく安定して維持され得る。この誤トラックファイルの削除は、これに相関を持つデータの入力が途絶えてから6秒間後になる。

c) トラックファイルの浪費

a) b) より、モードの誤認が断続的に発生すると正しいデータを持つトラックファイルと誤トラックファイルが両方維持される場合もある。トラックファイル数が扱える量の限界にあるとき、誤トラックファイルが近距離に発生すると遠距離にある必要なトラックファイルが消去される。この場合、トラックファイルに空きができた時点で必要なトラックの再捕捉処理が行われる。

以上をまとめると、監視用トラックに対するモードの誤認の影響は、正しい位置データを持つトラックファイルをコースト状態にすること、または、消去されている間と再捕捉処理を行う間に該当する相手機の位置データ等をACASアルゴリズムに送れないことである。誤トラックファイルも発生するが、監視用トラッキングフィルタが取り扱えるトラックファイル数に余裕があれば問題はないと考えられる。

4.3 アルゴリズム用トラックへの影響

ACASアルゴリズムは監視用トラックファイルとは独立したトラックファイルを持ち、ACASアルゴリズム用トラックを持つ。このトラックファイルは、監視用トラックファイルから与えられるデータを基に生成・維持される。監視用トラックファイルを消失してデータまたはコーストフラグが得られなくなると、対応するトラックファ

イルも消去される。

ACAS アルゴリズムは約25秒後の相手機の位置を予測し、衝突の危険性や回避方向の判断を行う。このため高度データの処理には、高度レートの推定精度が高くレート変更にも応答が速い非線形トラック⁽²⁾を使用している。この非線形トラックは、ACAS の誤動作を防ぐため、トラッキングされている高度レートの信頼性を表すフラグも発生する。相関が低いデータまたはコーストフラグのどちらかが2回以上連続して入力された場合、または、高度レートの変更が予測されるような場合に高度レートの信頼性は低く判定される。十分信頼性が回復していない状態では、コーストフラグ等が1回入力されただけで信頼性が低く判定される。信頼性の回復は、該当する航空機の運動状態によって必要な時間が異なる。また、アルゴリズム用トラックファイルが生成されてから高い信頼性の高度レートデータが得られるまでに、少なくとも2から9秒を必要とする。一般に、高度レートが低い場合には信頼性の回復・向上が遅くなる。

モードの誤認がACAS アルゴリズム用トラックに与える影響を次のように推定できる。

a) トラックファイルの消失

モードの誤認により監視用トラックが必要なトラックファイルを消失すると、アルゴリズム用トラックも同時にトラックファイルを消去する。

b) 高度レートの信頼性低下

正しいトラックファイルがコースト状態になる頻度が増加するため、高度レートの信頼性が低く判定される頻度も増加する。

c) 誤トラックファイルの生成

監視用トラッキングフィルタから誤トラックファイルに対応したデータが与えられるため、誤トラックファイルが生成される。

以上より、モードの誤認がACAS アルゴリズム用トラックに与える主な影響は、コーストの発生による高度レート推定値の信頼性低下およびトラックファイルの消失である。誤トラックファイルの生成・維持は、トラックファイルを浪費することになるが、ACAS が扱えるトラックファイル数に余裕があれば問題はないと考えられる。

4.4 ACAS アルゴリズムへの影響

ACAS アルゴリズムは、最接近の約25秒前に回避指示を発生するが、高い信頼性の高度レートデータが得られるまで回避指示の表示を遅らせる。これは、高度レートの信頼性が相手機の予測位置の信頼性に直接影響するためであり、誤警報を低減するための処理である。このため、高度レートの信頼性向上・回復にかかる時間だけ回避指示の表示が遅れる。

また、トラックファイルが消失した場合には、監視用トラックがこれを再び生成するまでに最低4秒かかり、アルゴリズム用トラックが高い信頼性の高度レートデータを得るまでに更に2～9秒かかる。このため、再び正しいデータが受信され始めてから回避指示を発生できるまで少なくとも6～13秒かかる。この間にコースト等が発生すると更に遅くなる。

ACAS とはほぼ同高度の航空機について、この現象により約1NMの距離測定値のずれが発生する位置関係の範囲を考える。相手機の最大接近速度を1,200 kt に仮定すれば25秒間に約8.3NM飛行する。ガーブル等の発生も考慮してトラックファイルの生成遅れ等に8秒間および高度レート推定値の信頼性向上に13秒間かかると仮定すれば、モードの誤認が回避指示の発生・表示に影響する最大距離が約15.3NMになる。これは、ACAS のシステムレンジ14NM全てを含み、影響がある最大高度は図15から約20,000 ftと求められる。これは異常接近になるか否かにかかわらず飛行中実際に起こり得る位置関係である。

次に、誤トラックについて考える。その高度データはモードA 応答符号を解読して得られた値であり、ACAS の高度に近い気圧高度符号と同じビットパターンをもつ符号が受信されない限り誤警報は発生しない。ゆえに、トラックファイルの浪費が主な影響になるが、前述のようにトラックファイル数に余裕があればACAS を誤動作させる頻度は小さいと考えられる。

以上より、ACAS アルゴリズムに対する主な影響は、必要な警報の発生遅れまたは消失であると予測できる。特にACAS の高度が20,000 ft以下の低高度では回避指示の発生・表示が必要な時期にモードの誤認が発生し得るため、誤認の発生頻度によってはACAS が十分に機能しない場

合も予測される。

4.5 実用型ACASの混信妨害対策の効果

実用型ACASについては、今回の実験で使用していない Whisper/Shout の使用が規定されている⁽²⁾。今回観測された現象について本文で推定した原因が正しい場合、この質問方式がこの現象の発生頻度に影響することも予測される。ここでは、この質問方式を使用した場合のモード誤認の発生率を近似計算し、混信妨害対策の効果を予測する。

4.5.1 Whisper/Shout

この質問方式をACASに用いる目的は同期性ガブル発生率の低減である⁽²⁾⁽⁷⁾。同期性ガブルは、ほぼ同じ距離にある複数のトランスポンダが同じ質問信号に対して応答信号を送信したとき、これらが重なり合って受信される現象である。このような状況になると、ACASのデコーダは応答信号の検出もれや符号の誤読を起し、相手機の位置を正しく測定できなくなる。

この質問方式は、質問信号の前に適当な電力比の抑圧パルスを送信することによって、同期性ガブルの発生を低減している。信号波形を図17に示す。抑圧パルスSと質問信号のP₁パルスが2μsの間隔で送信されており、これらが抑圧信号を形成する。それ以外はモードC一括質問信号と同じである。この信号がATCトランスポンダに受信されたとき、抑圧パルス電力がMTLを越えず質問信号電力がMTLを越える場合にのみ応答信号が送信される。

ATCトランスポンダにおける質問信号の受信電力はACASからの距離の関数であるが、航空

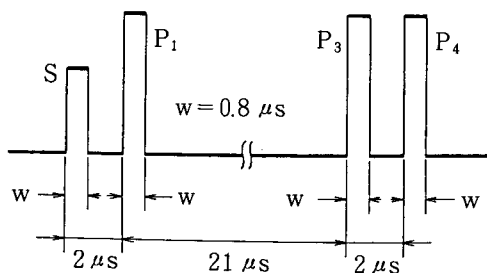


図17 Whisper/Shout 1段分の質問信号波形

機に搭載して使用される空中線の指向性の影響を受け、高度差、方位、航空機の姿勢によっても大きく変動する。このため、同じ距離にあるATCトランスポンダであっても、ACASから見た方向等が異なれば受信電力が等しいとは限らない。ここで、図17のような小電力の抑圧パルスSを伴う質問信号を用いると、実際にACASの周辺に存在するATCトランスポンダの一部しか応答しない。電力を変えながらこのような質問信号の送信を繰り返し、多数のトランスポンダの内から少しずつ応答信号を取得していくことにより同期性ガブルの発生を防止している。

4.5.2 モード誤認の発生条件

Whisper/Shoutを用いた場合について考察すると、ATCトランスポンダが受信する信号およびマルチパス波の電力が次の両条件を満たす場合にモードの誤認が発生する。

a) P₁パルスの受信電力がMTLを越え、かつ、Sパルスの受信電力がMTLを越えない。

b) マルチパス波の遅延時間が他のモードの質問パルス間隔の公差内であり、かつ、P₁パルスのマルチパス波の受信電力がMTLを越える。または、マルチパス波の遅延時間からSパルスとP₁パルスの間隔を引いた値が他のモードの質問パルス間隔の公差内であり、かつ、Sパルスのマルチパス波の受信電力がMTLを越える。どちらの場合も、マルチパス波の波形はパルス状で質問信号パルスとして解読される必要がある。

一方、Whisper/Shoutを使用しない場合には次の各条件を満たす必要がある。

d) P₁パルスの受信電力がMTLを越える。

b) マルチパス波の遅延時間が他のモードの質問パルス間隔の公差内であり、かつ、P₁パルスのマルチパス波がパルス状でその受信電力がMTLを越え質問信号パルスとして解読される。

ATCトランスポンダの受信感度低減機能の効果は、どちらの場合も無視できる。これは、マルチパス遅延時間が長く、7μsの場合でも受信機の感度が約20dB回復できるためである。更に、条件a)においては信号の受信電力がMTLに近い場合、感度低減されないからである。

どちらの条件も、P₁パルスの直接波と問題になるマルチパス波の電力比がP₁パルスのリンク

マージン（パルスの受信電力とMTLの比）以下になるときにモードの誤認が発生し得ることを示している。

直接波を基準にしたマルチパス波の電力分布を考えると、マルチパス波がMTLを越えて受信される頻度はリンクマージンが大きいほど高くなる。Whisper/Shoutを使用する場合は、MTLがSパルスおよび P_1 パルスの受信電力の間にあるトランスポンダのみが応答するため、Sパルスと P_1 パルスの電力比が小さいほどそのリンクマージンが小さくなり、モードの誤認の発生率が低下・改善されると予測できる。この場合、Sパルスの受信電力がMTLとほぼ等しい場合にリンクマージンが最大になるため、モードの誤認の発生頻度が最も高くなる。実用型のACASにおいては、Sパルスと P_1 パルスの電力比は2または3dBに設定されている⁽²⁾。

4.5.3 リンクマージン

ACASとATCトランスポンダ間の質問信号について考える。リンクマージン P_{LM} は、ACASの送信電力(P_a)、ATCトランスポンダのMTL(P_{MTL})、両装置の空中線利得(G_a 、 G_t)および給電線損失(L_a 、 L_t)、空中線間の距離 R 、使用する電波の波長 λ から概算できる。ACASの最大探知距離は20NM以下に設計されるため、大気吸収による損失を無視すると、リンクマージンは次の式から算出できる。

$$P_{LM} = P_a G_a G_t \lambda^2 / \{ (4\pi R)^2 L_a L_t P_{MTL} \} \quad (3)$$

例として、 P_a を54dBm、 G_a および G_t を0dBi、 λ を0.291m、 R を4NM、 L_a および L_t を3dB、 P_{MTL} を-72dBmとすると、 P_{LM} は10dBである。ただし、このように各機材の利得や損失に公称値を用いた場合、算出される値には機体の影響等による空中線の指向性パターンの変動や機器の特性のばらつき等は考慮されていない。

4.5.4 マルチパス波の電力分布の影響

前述のモードの誤認が発生する条件について考察するためには、直接波とマルチパス波の受信電力比のデータが必要である。これについては、文

献(6)に発表されている。この文献では、同じ高度を飛行する2機の航空機間で1,030MHzの電波をパルス変調して送受信した飛行実験によって、受信電力比分布を求めている。この受信電力分布は、反射面に対する電波の入射角および使用する空中線の取り付け位置によって変化する。また、反射面の性質によっても変化する。これは空中線の指向性および反射面の見かけの荒さの影響である。また、50ms以上の間隔で測定したマルチパス波受信電力の時間相関は、比較的静かな海面についても小さいことが確かめられている。以下では、文献(6)に発表されている静かな海面からのマルチパス波の受信電力分布のデータをもとにして考察する。

ATCトランスポンダは機体下部空中線しか使用しないが、ACASは機体上部空中線も使用する。このため、一方の航空機のみが機体上部空中線を使用する場合と両者とも機体下部空中線を使用する場合を考える必要がある。また簡単のために、各ATCトランスポンダについて、質問信号のリンクマージンと質問信号対マルチパス波電力比の各分布が独立であると仮定し、近似計算を行う。

最初に条件b)について考察する。ここではATCトランスポンダのMTLがSパルスとほぼ等しいと仮定して、発生頻度が最も高くなる場合を考える。Sパルスのマルチパス波が問題になるためには、マルチパス波の受信電力が直接波を越える必要がある。文献(6)の実験結果によれば、一方の航空機が機体上部空中線を使用している場合、海面反射マルチパス波の電力が直接波を越える頻度は1%以下である。また、両者とも機体下部空中線を使用している場合、この値は20%~30%である。 P_1 パルスのマルチパス波について考えると、マルチパス波の電力が直接波の電力の3dB下であるSパルスの電力より大きくなる確率は、一方が機体上部空中線を使用している場合で4%以下である。両方とも機体下部空中線を使用している場合、この値は50%~70%である。空中線取り付け位置による電力分布の差は空中線の指向性の差による。

一方、今回の実験装置のようにWhisper/Shoutを使用しない場合は、応答するトランスポンダのリンクマージンに上限がない。このため、各トラ

ンスポンダの平均的なリンクマージンがモード誤認の発生率に影響する。ACASと通常のATCトランスポンダの場合、使用機器の特性の公称値から求めた平均的なリンクマージンは、距離4NMにおいて約10dBである。マルチパス波の電力が直接波の電力の10dB下より大きくなる確率は、一方が機体上部空中線を使用する場合は40%以下である。両方とも機体下部空中線を使用する場合、この値は約90%である。

以上より、相手機がACASとほぼ同じ高度を飛行する場合、Whisper/Shoutの使用が質問信号のマルチパス波によるモードの誤認の発生を低減させることがわかる。特にACASが機体上部空中線を使用している場合は効果が大きく、距離4NMでは発生頻度が約40%から約4%に改善され約1/10になる。また、近距離の場合等リンクマージンが大きい場合にも効果が大きいと予測できる。

一方、機体下部空中線同士の場合、Whisper/Shoutを使用しない場合と比較して発生頻度は約90%から約60%に改善され約2/3に低下するが、30%以下の頻度で新たにSパルスのマルチパス波が原因となるモードの誤認が発生し得る。このとき、マルチパス波の遅延時間が9~11 μ sになる位置関係が問題になるが、図15に示したようにP₁パルスのマルチパス波が原因となる空域と隣接した別の空域になるため、両者が同時に発生することはない。

また、実用型ACASは各測定において機体上部および機体下部空中線の両方から各々独立してデータを取得するため、どちらか一方の空中線から正しいデータを取得できればトラックファイ

ルの入力データが中断することはない。しかし、一方の空中線からモードを誤認した応答信号が受信されると、誤トラックファイルが生成・維持され得る。

4.5.5 ACASへの影響の予測

Whisper/Shoutの使用によりモードの誤認の発生率が低下し、トラックファイルの消失確率および回避指示が遅れる確率は低下することが予測できる。ここでガープル等の他の理由による受信データの消失がない場合についてこの確率を概算し、効果を確かめる。

相手機の高度レートデータの信頼性低下は、ACASアルゴリズム用トラックの性質から、モードの誤認が2回連続したときに発生する。また、トラックファイルの消失は、監視用トラックの性質から、モードの誤認が6回連続したときである。誤トラックファイル生成のためには、その前段階で3回連続したモードの誤認が発生する必要がある。これらを一般化して、M回連続してモードの誤認が発生する確率を考える。

モードの誤認が発生し得る位置関係でN回のデータを測定したとき、各データ測定時のモード誤認の発生率Qを仮定し、この区間内でM回連続したモードの誤認が発生する確率P_Mを図18の状態遷移モデルを用いて計算した。図中の各円は状態を示しており、矢印は遷移する方向を示す。1回の測定毎に、矢印のそばに書かれている確率で状態が遷移して行く。図中の右端以外の各円が示す状態は、考えている測定までに円内に示したパターンでモードの誤認が発生しており、かつ、それまでに右端の円内に示した状態がまだ発生してい

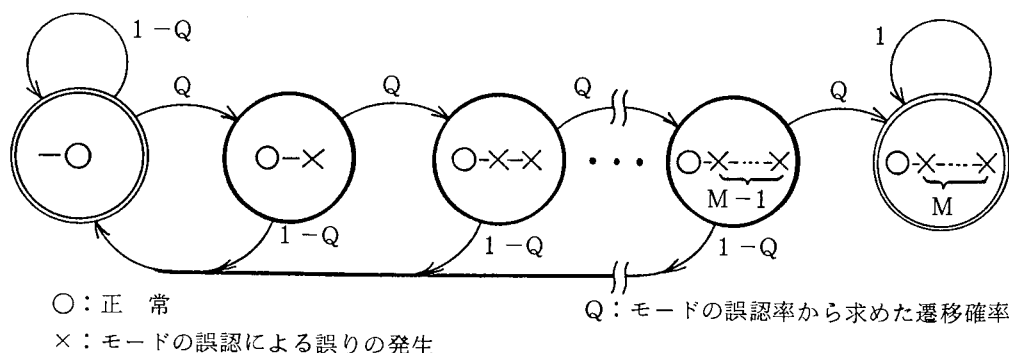


図18 M回連続した誤りの発生を表す状態遷移モデル

ない状態である。図の右端の円が示す状態は、測定開始からこれまでにM回連続したモードの誤認が発生したことがある状態を示す。t+1回目の測定による状態遷移の後、トラックファイルがある円が示す状態である確率P(t+1)は、その円にきているK本の矢印の内のi番目の遷移確率Q_iおよび遷移前にその矢印iの根元の状態にある確率P_i(t)から求めることができ、

$$P(t+1) = \sum_{i=1}^K Q_i P_i(t) \tag{4}$$

となる。初期状態はモードの誤認がまだ発生していない状態（図の左端の円）にある確率を1とし、他の状態を0とする。

遷移確率Q_iはモード誤認の発生率Q_mから求めた。機体上部空中線を用いた測定においてモードの誤認が発生する確率をQ_{mt}機体下部空中線の場合をQ_{mb}とすると、ある位置測定において両方の空中線についてモードの誤認が発生しトラックファイルに相関するデータを与えられなくなる確率Q_cは両者の積で求められる。

$$Q_c = Q_{mt} Q_{mb} \tag{5}$$

また、ある位置測定においてどちらか一方の空中線についてモードの誤認が発生し誤ったデータが監視用トラックに入力される確率Q_fは次のように求められる。

$$Q_f = 1 - (1 - Q_{mt})(1 - Q_{mb}) \tag{6}$$

計算に用いたQ_{mt}およびQ_{mb}の値を表3に示す。表3の値は、文献(6)を参考に定めた。計算結果を表4、表5に示す。これらの表の値は、モードの誤認が発生し得る期間について、モードの誤認によるコストによりトラックファイルが消失する確率、高度レートデータの信頼性が低下する確率、誤トラックファイルが生成される前提条件である3回連続したモードの誤認の発生確率を示す。誤トラックファイルが生成される確率は、表5に示されている3回連続したモードの誤認の発生確率より小さい値である。

ここで計算に用いた仮定をまとめると次のようになる。

表3 ACASの空中線と仮定したモードの誤認の発生率

信号パルス	モード誤認 が発生する S MR	機体上部 空 中 線	機体下部 空 中 線
W/S のS	≤ 0dB	0.01	0.3
W/S のP ₁	≤ 3dB	0.04	0.7
非W/S のP ₁	≤ 10dB	0.4	0.9

S MR : Signal to Multipath Ratio
 S MR = (信号電力) / (マルチパス波電力)
 W / S : Whisper/Shout

表4 モードの誤認のACASへの影響
 (P₁パルスのマルチパスによるデータの消失)

測定回数	信頼性低下の発生率		トラックファイル消失率	
	W/S使用	W/Sなし	W/S使用	W/Sなし
2	0.00	0.13	0.00	0.00
3	0.00	0.21	0.00	0.00
4	0.00	0.30	0.00	0.00
5	0.00	0.37	0.00	0.00
6	0.00	0.43	0.00	0.00
7	0.00	0.49	0.00	0.00
8	0.01	0.54	0.00	0.00
9	0.01	0.59	0.00	0.01
10	0.01	0.63	0.00	0.01
20	0.01	0.88	0.00	0.02
30	0.02	0.96	0.00	0.04
40	0.03	0.99	0.00	0.05
50	0.04	1.00	0.00	0.06
60	0.04	1.00	0.00	0.08
70	0.05	1.00	0.00	0.09
80	0.06	1.00	0.00	0.10
90	0.07	1.00	0.00	0.11
100	0.07	1.00	0.00	0.13

W / S : Whisper/Shout

表5 モードの誤認のACASへの影響
 (誤トラックファイル生成の原因になる3回連続したモード誤認の発生率)

測定回数	W/S使用		W/Sなし
	S パルス	P ₁ パルス	P ₁ パルス
3	0.03	0.36	0.83
4	0.05	0.46	0.88
5	0.07	0.57	0.93
6	0.09	0.67	0.98
7	0.11	0.74	0.99
8	0.13	0.79	0.99
9	0.15	0.84	1.00
10	0.16	0.87	1.00
20	0.33	0.99	1.00
30	0.46	1.00	1.00
40	0.55	1.00	1.00
50	0.65	1.00	1.00
60	0.72	1.00	1.00
70	0.77	1.00	1.00
80	0.82	1.00	1.00
90	0.85	1.00	1.00
100	0.88	1.00	1.00

W / S : Whisper/Shout

a) モードの誤認以外に混信妨害が発生していない。質問信号を受信したATCトランスポンダの応答率は1.0である。また、ACASがATCトランスポンダの応答信号を正しく受信解読する確率も1.0である。

b) 直接波に対するマルチパス波の電力比の分布を考慮するが、直接波の電力変動は無視する。また、各ATCトランスポンダについて、質問信号のリンクマージンと質問信号対マルチパス波電力比の各分布が独立である。

c) 連続した測定について、マルチパスの受信電力は相関が十分小さく、各測定は独立した事象として扱うことができる。

d) Whisper/Shout 方式では1回の測定につき多数の質問信号を送信するが、この内のひとつにのみ目的の応答信号が得られる可能性がある。

e) ある1回の測定において、機体上部または機体下部空中線のどちらか一方から目的のトラックファイルと相関する応答が取得された場合、これをトラックファイルの生成または維持に用いるデータに使うことができる。

f) トラックファイルの生成と維持は4.2に示した方法にしたがう。あるトラックファイルに対応するATCトランスポンダが6回連続してモードを誤認すると、そのトラックファイルは消去される。また、3回連続してモードを誤認した場合、誤トラックファイルの生成が準備される。

g) 高度レートデータの信頼性は、ACASアルゴリズム用トラックの性質より、2回連続してコーストが発生した場合に低いと判定されるものとする。このとき、回避指示は表示されない。

h) 航空機は互いにはほぼ同高度で静かな海上を水平飛行する。

表4は P_1 パルスのマルチパス波によるモードの誤認についての値である。Sパルスについては信頼性の低下率が0.001以下であり、無視できる値であったためここには示さない。表4の値は、Whisper/Shoutの使用がモードの誤認率を減少させるため、トラックファイルの消失確率および高度レートデータの信頼性低下率が著しく減少・改善することを示している。表3のようにモード誤認率の減少は機体上部空中線の方が著しく、機体下部空中線については効果が小さいと仮定している。しかし、機体上部及び機体下部空中線のど

ちらか一方から正しいデータを取得できればコーストが発生しないため、全体としては正しい応答データを取得する確率を高くできている。

一方、誤トラックファイルの生成の前提になる3回連続したモードの誤認の発生率(表5)は、 P_1 パルスによるモードの誤認が発生し得る位置関係で測定を5回行った場合で約60%、10回で約90%であるため十分に改善されていない。これは、一方の空中線からモードを誤認した応答信号が受信されるとこれを用いて誤トラックファイルが生成され得るからであり、特に機体下部空中線を用いた場合のモードの誤認の発生率が十分に改善されていないからである。

ここで計算した値は、ほぼ同じ高度を水平飛行する航空機についてであることに注意を要する。ATCトランスポンダの空中線は機体下部に装備されるため、相手機が低高度側から接近する場合については、ACASの機体上部空中線のリンクマージンが著しく低下する。この場合、モードの誤認が発生しにくい機体上部空中線を用いた測定データが得られない場合が多くなるため、前述のデータほどには改善を見込むことはできない。この場合、図12の例のようにモードの誤認が発生し得る位置関係の範囲は狭くなるが、ACASが回避指示を発生する時期になる場合があるため、回避指示が一時消失する可能性がある。逆に相手機が高高度側から接近する場合には機体上部空中線から質の高いデータを得ることができるため、特性の改善を見込むことができる。

以上より、Whisper/Shoutの使用はモードの誤認によるデータの欠落を減少させ、トラックファイルの維持や相手機の位置推定の信頼性向上に効果があることがわかる。モードの誤認による誤トラックファイルの生成は十分防ぐことができないと予測されるが、ACASが取り扱えるトラックファイル数に余裕があれば問題はないと考えられる。日本国内では半径14NM以内に10機以上の航空機が検出されることは稀である。実用型ACASは30機以上のトラックファイルを維持できるため、特に問題にはならないと予測できる。

ただし、今回行った計算はいくつかの条件のもとでの結果であり、より一般的な場合については航空機に搭載された空中線の指向性や受信電力分布等を考慮し更に詳細な確析が必要である。

5 まとめ

航空機衝突防止装置ACASの飛行実験において、ある特定の位置関係にある航空機からの応答信号の消失とともに別の符号を持つ応答信号を約1NM近距離に測定する場合が観測された。応答信号の受信波形データや使用した機器の特性およびこの現象の発生状況から考えて、ACASの質問信号とそのマルチパス波を受信したATCトランスポンダが質問信号モードを誤認したことがその原因と推定される。

今回の現象は、ACASが使用する位置測定データに欠落と誤りを発生させる。このため、モードの誤認の発生は、ACASの回避指示の発生を遅らせる等その能力を低下させることが予測される。しかし、今回の実験装置とは異なり、実用型ACASにおいては各種の混信妨害対策が施されている。概算の結果、ガブル対策の目的で使用されるWhisper/Shout 質問方式がモード誤認の影響を軽減することがわかった。また、誤トラックの発生は十分防ぐことができないと予測されるが、ACASが取り扱えるトラックフェイル数に余裕があれば問題はないと考えられる。

謝辞

本研究にご協力下さいました関係各位に感謝申し上げます。特に東洋通信機株式会社の山本光男氏からATCトランスポンダの動作について有益な助言をいただきました。

参考文献

- (1) ICAO "Aeronautical Telecommunications ANNEX 10" 1987年3月
- (2) RTCA "Minimum Operational Performance Standards for Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS) Airborne Equipment vol-I", 1983年9月 (1988年2月の改訂まで)
- (3) 白川, 惟村「モードCのBCASの飛行実験について」電子航法研究所研究発表会講演概要 昭和58年5月
- (4) 東洋通信機株式会社, 航空振興財団「昭和55年度衝突防止装置調査研究報告書付属書」昭和

56年2月

- (5) 小瀬木, 福田, 白川「航空機衝突防止装置への混信妨害の測定」電子航法研究所研究発表会講演概要 平成元年5月
- (6) A. R. Paradis "L-Band Air-to-Air Multipath Measurements", AD-A 045941, 1977年9月
- (7) E. J. Koenke, S. Boczenowski "The Effect of Whisper/Shout on Active BCAS Performance", FAA-EM-80-5, 1980年6月
- (8) N. A. Spencer, P. M. Ebert, L. T. Moses "Assesment of the Performance of an Active ATCRBS Mode for Beacon Collision Avoidance", AD-A 047670, 1977年10月
- (9) K. J. Keeping, J. C. Sreau "Scale Model Pattern Measurements of Aircraft L-Band Beacon Antennas", AD-A 010479, 1973年4月
- (10) Michael C. Steavens "Secondary Surveillance Rader", pp 201 - 202, Artech House, 1988年